



Атермализованные телевизионные объективы

И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич
НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

Представлена конструкция атермализованных телевизионных объективов для систем наблюдения: 3-линзовый телеобъектив с относительным отверстием $F/5.6$, 7-линзовый апохромат с относительным отверстием $F/4$ и 9-линзовый объектив с относительным отверстием $F/2.8$. При расчете объективов учтена совокупность факторов, которые влияют на величину расчетного разрешения объектива: размер сенсора, фокусное расстояние, относительное отверстие. Но в реальном производстве при сборке конструкции объектива не всегда можно достичь расчетного качества изображения. Рассмотрена чувствительность оптических схем к допускам конструкции.

Ключевые слова: телевизионные объективы, атермализация, оптическая передаточная функция

Статья получена: 15.10.2021

Статья принята: 29.11.2021

ВВЕДЕНИЕ

Объективы, применяемые в современных устройствах, работают в широком диапазоне температур от -50° до 50° . В длиннофокусных объективах компоненты разделены большим воздушным промежутком, и колебания температуры вызывают изменение длины оправ, воздушных промежутков и оптических сил линз, что приводит к смещению плоскости изображения [1, 2]. Для многих оптических систем, которые подвергаются воздействию широкого диапазона температур, изменение температуры оказывает основное влияние на изменение показателя преломления оптического стекла и геометрию элементов линз. Это влияет на свойства изображения объектива и вызывает дополнительные aberrации из-за отклонения параметров конструкции от расчетных значений системы. Поэтому атермализация объективов является

Athermalized Television Lenses

I. P. Shishkin, A. P. Shkadarevich
RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus

The design of athermalized television lenses is presented for systems observations: 3-lens $F/5.6$ telephoto lens, 7-lens $F/4$ apochromat and 9-lens $F/2.8$ aperture. At calculation lenses have been read factors affecting on the value lens design resolution: size sensor, focal distance, relative hole. However, in real production, when assembling a lens structure, it is not always possible to achieve the calculated image quality. The sensitivity of optical schemes to design tolerances is considered.

Key words: television lenses, athermalization, optical transfer function

Received on: 15.10.2021

Accepted on: 29.11.2021

INTRODUCTION

Lenses used in modern devices operate in a wide temperature range from -50° to 50° . In long-focus lenses, the components are separated by a large air gap, and temperature fluctuations cause a change in the length of the frames, air gaps, and optical powers of the lenses, which leads to a shift in the image plane [1, 2]. For many optical systems that are exposed to a wide range of temperatures, temperature change has a major effect on the change in the refractive index of the optical glass and the geometry of the lens elements. This affects the image properties of the lens and causes additional aberrations due to the deviation of the design parameters from the calculated values of the system. Therefore, athermalization of lenses is one of the key requirements for the lenses of surveillance systems [3].

There are two methods for athermalizing lenses. The first method, the passive athermalization method, consists in using a combination of glasses with different thermal expansion coefficients in the lens design, due to which the defocusing of the image does not exceed a few micrometers when the temperature changes. The second method involves using the move-

одним из ключевых требований, предъявляемых к объективам систем наблюдения [3].

Существует два метода атермализации объективов. Первый метод, метод пассивной атермализации, заключается в применении в конструкции объектива комбинации стекол, обладающих различными коэффициентами температурного расширения, благодаря чему расфокусировка изображения при изменении температуры не превышает нескольких единиц микрометров. Второй метод подразумевает использование подвижки определенной группы линз для стабилизации плоскости изображения, что требует более сложной конструкции объектива из-за необходимости включения в нее большего числа линз и механизма фокусировки. В статье рассматривается применение метода пассивной атермализации.

Одним из параметров, определяющих качество изображения объектива, является относительное отверстие. Чем оно выше, тем большего разрешения можно достичь при оптическом расчете. На практике светосильный объектив с высоким контрастом позволяет получить более детальное изображение удаленного объекта.

С другой стороны, увеличение относительного отверстия в длиннофокусном объективе автоматически приводит к росту диаметров линз и габари-

ментов определенной группы линз для стабилизации изображения, что требует более сложной конструкции объектива из-за необходимости включения в нее большего числа линз и механизма фокусировки. В статье рассматривается применение метода пассивной атермализации.

Одним из параметров, определяющих качество изображения объектива, является относительное отверстие. Чем оно выше, тем большего разрешения можно достичь при оптическом расчете. На практике, высокоотверстие, высококонтрастный объектив позволяет получить более детальное изображение удаленного объекта.

С другой стороны, увеличение относительного отверстия в длиннофокусном объективе автоматически приводит к росту диаметров линз и размеров определенной группы линз для стабилизации изображения, что требует более сложной конструкции объектива из-за необходимости включения в нее большего числа линз и механизма фокусировки. В статье рассматривается применение метода пассивной атермализации.

DESIGN

Figure 1 shows the layout and optical characteristics of athermalized lenses with a focal length of 300 mm. The presented optical transfer function graphs show that the image contrast obtained with a 7-element lens is noticeably higher than with a 3-element lens. The main design parameters of the lenses under consideration are given in Table 1.

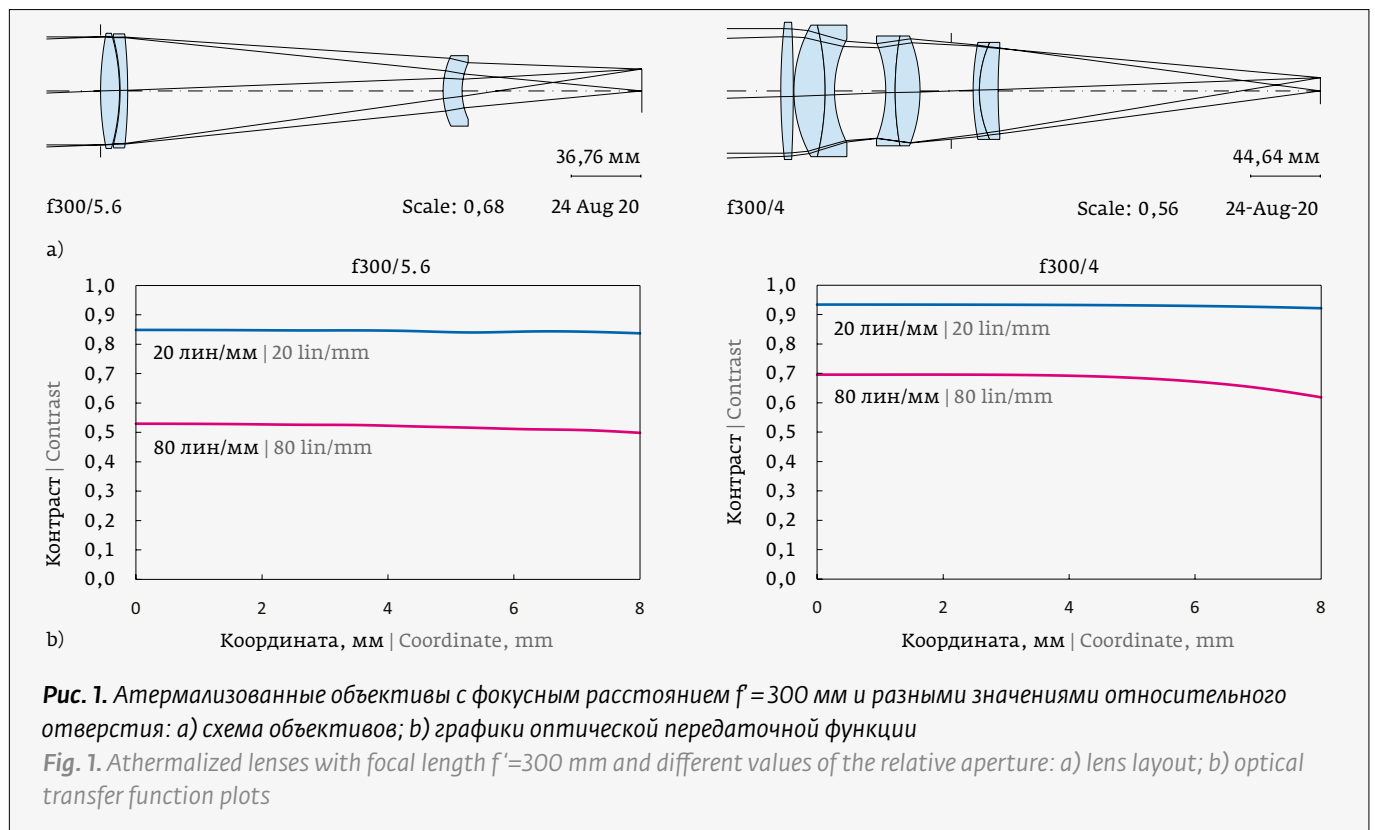


Таблица 1. Основные параметры конструкции рассматриваемых объективов

Table 1. Main design parameters of the considered lenses

Объектив Lens	Тип Type	Относительное отверстие Relative hole	Разрешение, лин / мм Permission, lin / mm	Световой диаметр, мм Light diameter, mm	Угловое поле Corner field	Формат сенсора Sensor format	Длина, мм Length, mm	Вес линз, г Lens weight, g
f300/5,6	Телеобъектив Telephoto lens	F/5,6	80	56	4°	4/3"	285	150
f300/4	Ретрофокус Retrofocus	F/4	80	80	3°	1"	330	900
f100/2,8	Ретрофокус Retrofocus	F/2,8	160	40	12°	4/3"	165	160

тов. При этом точность изготовления линз должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить расчетное разрешение в собранном объективе [4].

КОНСТРУКЦИЯ

На рис. 1 показаны схема и оптические характеристики атермализованных объективов с фокусным расстоянием 300 мм. На представленных графиках оптической передаточной функции видно, что контраст изображения, получаемого с помощью 7-линзового объектива, заметно выше, чем при использовании 3-линзового объектива. Основные параметры конструкции рассматриваемых объективов приведены в табл. 1.

АПОХРОМАТИЗАЦИЯ

Дифракционная микроструктура в виде дифракционного оптического элемента (ДОЭ), размещенная на одной из поверхностей 3-линзового объектива, позволяет выполнить его апохроматизацию [5-8].

АПОХРОМАТИЗАЦИЯ

A diffractive microstructure in the form of a diffractive optical element (DOE) placed on one of the surfaces of a 3-element lens makes it possible to perform its apochromatization [5-8]. As a result, the resolution of the lens will be almost the same as in the 7-lens design. The influence of apochromatization on the value of the contrast of the lenses is shown in Table 2.

SENSITIVITY

The output characteristics of the assembled lens are highly dependent on the design. For this reason, the image quality achieved in the calculation cannot always be ensured in real production. Let's compare the two lens designs. Both designs have different sensitivity to tolerances (de-centering and lens tilt):

- 3-element telephoto lens (Fig. 1 a, left) – 1 and 2 lenses are separated by a small air gap (0.3-0.5 mm);

Таблица 2. Влияние апохроматизации на величину контраста объективов

Table 2. Effect of apochromatization on the lens contrast value

Объектив Lens	Тип Type	Число линз Number of lenses	Наличие (+) или отсутствие (-) ДОЭ Presence (+) or absence (-) of DOE	Рабочий спектр, нм Working spectrum, nm	Смещение хро- матического фокуса, мкм Chromatic focus shift, μm	Контраст Contrast	
						80 лин / мм 80 lines / mm	160 лин / мм 160 lines / mm
f300/5.6	Ахромат Achromat	3	-	430-650	180	0,57	0,29
f300/5.6	Апохромат Apochromat	3	+	430-650	27	0,67	0,39
f300/4	Апохромат Apochromat	7	-	430-650	40	0,68	0,43
f300/4	Апохромат Apochromat	7	+	430-650	13	0,77	0,53

Примечание: ДОЭ – дифракционный оптический элемент

Note: DOE – diffractive optical element

В результате этого разрешение объектива станет практически таким же, как в 7-линзовой конструкции. Влияние апохроматизации на величину контраста объективов показано в табл. 2.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Выходные характеристики собранного объектива в значительной степени зависят от конструкции. По этой причине качество изображения, достигнутое при расчете, не всегда можно обеспечить в реальном производстве. Сравним два варианта конструкции объектива. Обе конструкции имеют разную чувствительность к допускам (децентрировке и наклону линз):

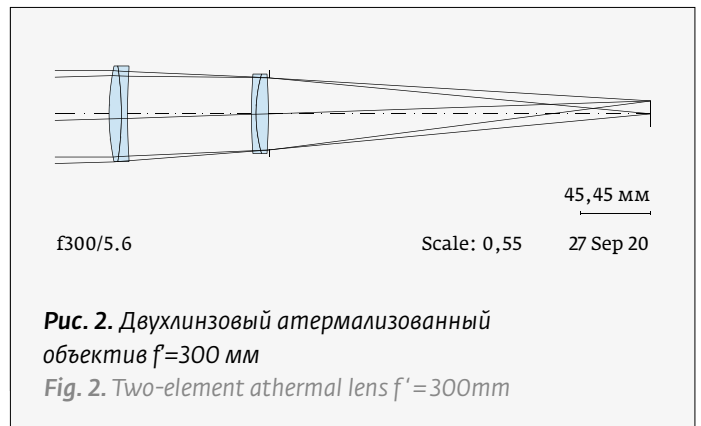
- 3-линзовый телеобъектив (рис. 1а, слева) – 1 и 2 линза разделены малым воздушным промежутком (0,3–0,5мм);
- 2-линзовый объектив (рис. 2) – две склеенные линзы разделены большим воздушным промежутком (70–80мм).

В табл. 3 дано сравнение двух вариантов объективов по чувствительности к децентрировке и наклону линз при учете расчетных параметров по разрешению и контрасту. Данные табл. 3 показывают, что 2-линзовый объектив менее чувствителен к децентрировке и наклону линз (примерно в 5 раз). Это означает, что конструкция 2-линзового объектива более предпочтительна для производства, несмотря на то, что расчетный контраст объектива ниже.

АТЕРМАЛИЗАЦИЯ

В табл. 4 приведены марки стекол каталога Ohara [9], которые были использованы при создании атермализованных объективов с фокусным расстоянием 300 мм. В табл. 4 указаны: n_D – показатель преломления, v_D – число Аббе и α_D – коэффициент температурного расширения оптического стекла.

Результат стабилизации положения плоскости изображения 3-линзового и 7-линзового объективов с фокусным расстоянием 300 мм при изменении рабочих температур от -50° до 50° иллюстрируют



- 2-element lens (Fig. 2) – two glued lenses are separated by a large air gap (70–80mm).

In table. Figure 3 compares two lens options in terms of sensitivity to decentering and tilt of the lenses, taking into account the calculated parameters for resolution and contrast. Table 3 shows that the 2-element lens is less sensitive to lens decentering and tilt (about 5 times). This means that the 2-element lens design is more preferable for production, despite the fact that the calculated contrast of the lens is lower.

АТТЕРМАЛИЗАЦИЯ

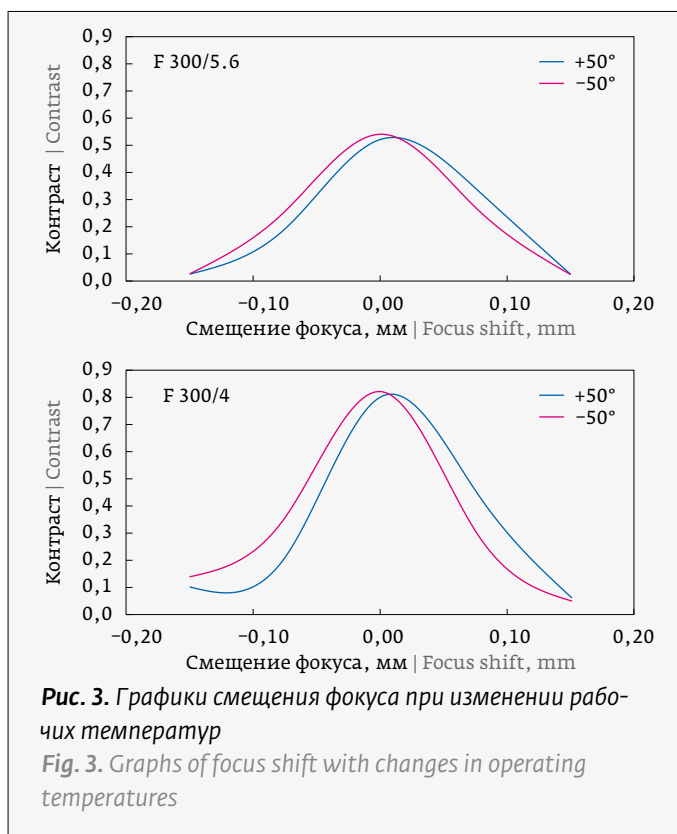
Figure 4 shows the brands of glasses from the Ohara catalog [9], which were used to create athermalized lenses with a focal length of 300 mm. Table 4 shows: n_D is the refractive index, v_D is the Abbe number and α_D is the coefficient of thermal expansion of the optical glass.

The result of stabilization of the position of the image plane of the 3-element and 7-element lenses with a focal length of 300 mm when operating temperatures change from -50° to 50° is illustrated by the graphs in Fig. 3. The graphs show the appearance of a focus shift at a spatial frequency of 80 lines/mm. The defocusing of the image when the temperature changes does not exceed a few units of micrometers.

Таблица 3. Чувствительность объектива к децентрировке и наклону линз в конструкции

Table 3. Lens sensitivity to decentering and lens tilt in design

Конструкция Design	Тип Type	Длина, мм Length, mm	Контраст Contrast	Разрешение Permission	Децентрировка Decentering		Наклон Tilt	
					1 линза 1 lens	2 линза 2 lens	1 линза 1 lens	2 линза 2 lens
3 линзы 3 lenses	Телеобъектив Telephoto lens	285	0.57	80 лин/мм 80 lin/mm	$\pm 0,02$ мм ± 0.02 mm	$\pm 0,02$ мм ± 0.02 mm	$\pm 1.2'$	$\pm 1.2'$
2 линзы 2 lenses	Ретрофокус Retrofocus	350	0.5	80 лин/мм 80 lin/mm	$\pm 0,1$ мм ± 0.1 mm	$\pm 0,1$ мм ± 0.1 mm	$\pm 6'$	$\pm 6'$



графики на рис. 3. Графики показывают появление смещения фокуса на пространственной частоте 80 лин/мм. Расфокусировка изображения при изменении температуры не превышает нескольких единиц микрометров.

ОБЪЕКТИВ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ 100 мм

Вид и характеристики атермализованного объектива с фиксированным фокусом 100 мм и относительным отверстием F/2,8 показаны на рис. 4. Объектив рассчитан для сенсора 4/3" и имеет разрешение 160 лин/мм. Для пиксела размером 3 мкм разрешение камеры с этим объективом составит 24 мегапиксела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенная комбинация стекол и применение ДОЭ позволяют создать атермализованный телевизионный объектив с высоким разрешением и стабилизацией плоскости изображения. Длина фокусного расстояния объектива и величина относительного отверстия зависят от технологических возможностей производства изготовления линз большого диаметра и оборудования, обеспечивающего высокую точность при сборке объектива и контроле его выходных характеристик.

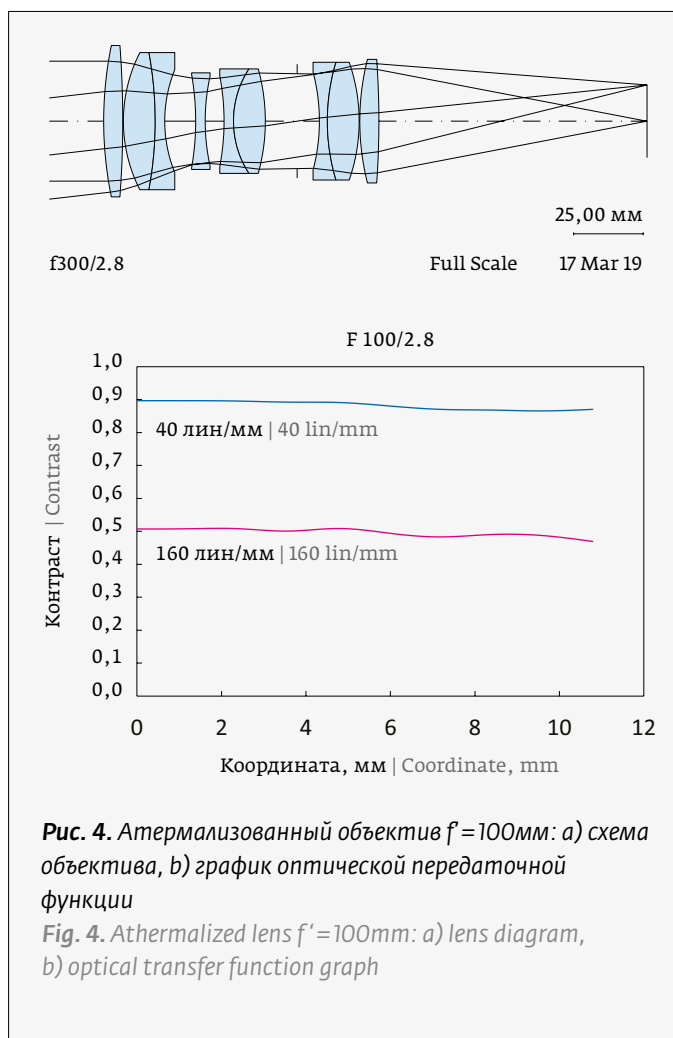


Таблица 4. Марки стекол, используемых в рассчитываемых объективах [9]

Table 4. Brands of glasses used in calculated lenses [9]

Объектив Lens	Марка стекла Glass brand	n_p	ν_p	α_p
f300/5.6	S-FPL52	1,4560	90,29	$13,3 \cdot 10^{-6}$
	S-LAM60	1,7432	49,34	$5,4 \cdot 10^{-6}$
	S-LAL8	1,7130	53,87	$6,1 \cdot 10^{-6}$
f300/4	S-PHM52	1,6180	63,33	$10,1 \cdot 10^{-6}$
	S-LAM7	1,7495	35,28	$6,7 \cdot 10^{-6}$
	S-NBH58	1,7888	28,43	$7,4 \cdot 10^{-6}$
	S-TIH11	1,7847	25,68	$8,9 \cdot 10^{-6}$
	S-NPH1	1,8081	21,76	$8,3 \cdot 10^{-6}$
	S-NBH53V	1,7380	32,33	$7,1 \cdot 10^{-6}$
	S-FPM2	1,5952	67,74	$11,7 \cdot 10^{-6}$

REFERENCES

1. **Medvedev A., Grinkevich A., Knyazeva S.** Objective Athermalization Of Sighting And Observation Systems As An Instrument To Ensure Functioning Of Armor And Tank Weapons. *Photonics Russia*. 2016; 56(2): 94–108.
2. **Shishkin I. P., Shkadarevich A. P.** Television Lenses for Surveillance Systems. *Photonics Russia*. 2020; 14 (1): 96–105. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.1.96.104.
3. **Reshidko D., Nakanato M., Sasián J.** Ray Tracing Methods for Correcting Chromatic Aberrations in Imaging Systems. *International Journal of Optics*. 2014;10:351584. DOI: 10.1155/2014/351584.
4. **Minigazimov R. I., Mitrofanov S. S.** Development of a Materialized Lens for the Control System of Large-Sized Objects. *Opticheskiy Zhurnal*. 2020; 87(4): 336–43. DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-04-36-43.
5. Japanese Patent 5392618. *Achromatic athermal lens system and optical apparatus with the same* / Sudo Kenta. 2014–01–22.
6. **Xie Hongbo, Ren D., Wang Ch., Mao Ch., Yang Lei.** Design of high-efficiency diffractive optical elements towards ultrafast mid-infrared timestretched imaging and spectroscopy. *Journal of Modern Optics*. 2018; 65(3): 255–261. DOI: 10.1017/9781108625388.008
7. **Werdehausen D., Burger S., Staude I., Pertsch T., Decker M.** Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements. *Optica*. 2019;6(8): 1031–1038. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.001031>.
8. **Chen W.T., Zhu A. Y., Sanjeev V., Khorasaninejad M., Shi Z., Lee E., Capasso F.** A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the. *Nature Nanotechnology*. 2018;13: 220–226. <https://www.nature.com/articles/s41565-017-0034-6>.
9. OHARA. *Optical Glass Catalogue Excellent*. <https://oharacorp.com/catalog>.

ОБ АВТОРАХ

Шишкин Игорь Петрович, к. т. н., в. н. с., shipoflens@mail.ru, НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Шкадаревич Алексей Петрович, д. ф.-м. н., в. н. с., НТЦ «ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Разработка и исследования выполнены за счет собственных средств НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

LENS WITH A FOCAL LENGTH OF 100 MM

The appearance and characteristics of an athermalized lens with a fixed focus of 100 mm and a relative aperture of F/2.8 are shown in Fig. 4. The lens is designed for a 4/3" sensor and has a resolution of 160 lines/mm. For a 3 micron pixel, the camera resolution with this lens will be 24 megapixels.

CONCLUSION

A certain combination of glasses and the use of a DOE makes it possible to create an athermalized television lens with high resolution and stabilization of the image plane. The length of the focal length of the lens and the size of the relative aperture depend on the technological capabilities of the production of large-diameter lenses and equipment that provides high accuracy when assembling the lens and controlling its output characteristics.

ABOUT AUTHORS

Shishkin Igor Petrovich, Cand. of Science (Eng.), shipoflens@mail.ru, RTC «LEMT» BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Shkadarevich Alexey Petrovich, Dr. of Science (Phys.&Math.), RTC «LEMT» BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Development and research are carried out at the expense of RTC «LEMT» BELOMO.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest.

Промышленные высокочастотные плазменные системы

Проектирование и производство

ВЧ -Ионных источников
-Генераторов плазмы
-Генераторов мощности
-Согласующих устройств

